

Proyecto de electrificación rural mediante un sistema de energía eólica empleando el software WAsP

.....
Jorge Luis Maldonado Correa⁸

Introducción

La provincia de Loja, con un total de 448.966 habitantes y una superficie de 11.026 km², que representa el 4% del país, es un área particularmente beneficiada por la naturaleza en cuanto a recursos naturales renovables, que constituyen fuentes alternativas de energía. En base a estudios aislados se puede mencionar su potencial eólico con zonas microlocalizadas de vientos sostenidos superiores a los 10 m/s, y las potencialidades de radiación solar con promedios superiores a 4 kWh/m² al día, en el cantón Zapotillo, por citar un ejemplo.

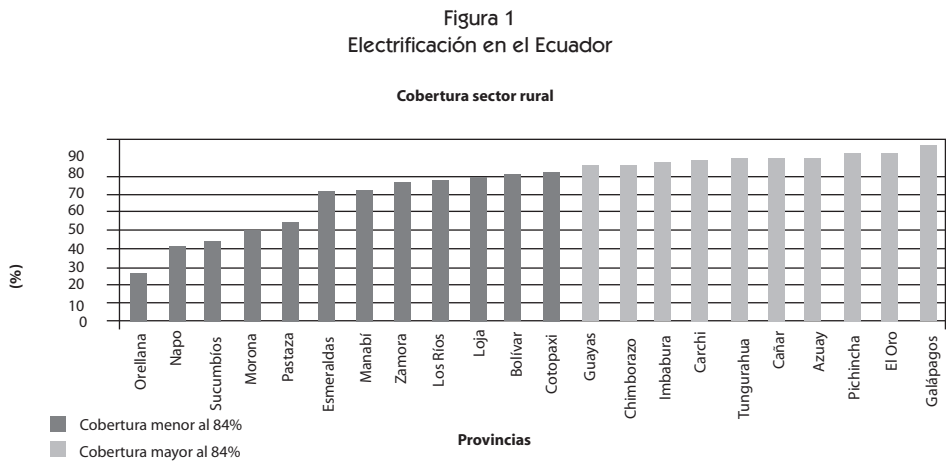
La distribuidora de electricidad en la provincia de Loja es la Empresa Eléctrica Regional de Sur (EERSSA) y tiene un área de concesión de alrededor de 8.9% del territorio ecuatoriano, que corresponde a 22.721 km². Esta área comprende las provincias de Loja, Zamora Chinchipe y Morona Santiago (Gualaquiza). En junio de 2008, para un número de viviendas proyectadas por el Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos (INEC) de 157.640, se alcanzó a totalizar 121.656 viviendas electrificadas, que equivale al 77.17% de cobertura, un valor inferior al registrado en diciembre de 2006, que tuvo una cobertura de electrificación del 84.5%. En la actualidad, aproximadamente el 21% de las viviendas no disponen de energía eléctrica. En el Ecuador, la cobertura de electrificación es de aproximadamente 91% a nivel nacional y en el sector rural es del 85% (ver figura 1).

La carencia de energía eléctrica en la comunidad La Palmira influye directamente en el desarrollo social, económico y productivo de sus habitantes. Estudios realizados por el Banco Mundial (1995) muestran cómo el acceso a la energía eléctrica en América Latina trae resultados positivos en cuanto al aumento de la calidad de vida, debido al incremento de las horas del día utilizables en tareas productivas y a la posibilidad de actividades de entretenimiento. Así, resulta imperativo el desarrollo de investigaciones que contribuyan a determinar las reales potencialidades del recurso eólico en la comunidad de La Palmira, con la finalidad de proyectar un sistema de generación de electricidad que utilice como energía primaria un recurso natural renovable, gratuito y abundante como es el viento, todo esto con el propósito de incidir en el desarrollo social y productivo de La Palmira.

8 Universidad Nacional de Loja, Centro de Investigaciones de Energías Renovables (CIEREE), Ecuador.

Determinación del potencial eólico

La determinación del potencial eólico implica la caracterización del viento en la comunidad La Palmira, y al no disponer de información meteorológica del sitio, se procede a utilizar diferentes metodologías como son la utilización de la escala de Beaufort, el uso del software WASP y la aplicación de modelos numéricos para extrapolación de datos, todos estos procedimientos orientados básicamente a la determinación de la velocidad media de viento y el potencial eólico.



Estimación de la demanda de consumo de energía eléctrica

El estudio de la demanda se estimó en base a criterios que cubran las necesidades básicas y provean mejor calidad de vida, como son: higiene, salud, comodidad, entretenimiento y comunicación.

La potencia consumida por los equipos y su estimación de uso durante el día se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1
Demanda del lugar en estudio

Elemento	P (W)	Cantidad	P. Total (W)	h/día	kWh/día
Refrigeradora	100	1	100	12	1.200
Licuadaora	300	1	300	0.1	30
Televisor	80	1	80	6	480
Radio	20	1	20	5	100
Lámparas fluorescentes	10	3	30	4	120
Teléfono	10	1	10	1	10
Total	520	8	540		1.940

Tomando en consideración las posibles variaciones en el consumo, que puede ser causado principalmente por el incremento de artefactos eléctricos, se utilizó un factor de seguridad de 30%. El consumo promedio de energía eléctrica (C_{EU}) establecido para cada vivienda por día fue de:

$$C_{EU} = 1.940 * 1.3 = 2522 = 2.52 \text{ kWh/día (1)}$$

Es conveniente tomar en cuenta un posible incremento de sus habitantes, por lo cual se decidió calcular el consumo energético de toda la comunidad proyectando una cantidad de 20 viviendas:

$$C_{ET} = C_{EU} * (\text{número de viviendas proyectadas}) \text{ (2)}$$

Donde:

C_{ET} = consumo de energía total

C_{EU} = consumo de energía de una vivienda

Entonces tenemos:

$$C_{ET} = 2.52 \text{ kWh/día} * (20) = 50.4 \text{ kWh/día}$$

Se considera en este estudio una proyección de una escuela y de un subcentro de salud. Para estos requerimientos energéticos se estimó un incremento del 5% de total del consumo de la comunidad.

En este contexto, la demanda energética que cubrirá el aerogenerador D_{ET} , se establece por:

$$D_{ET} = C_{ET} + (0.05 * C_{ET}) \text{ (3)}$$

$$D_{ET} = 50.4 \text{ kWh/día} + (0.05 * 50.4) = 52.82 \text{ kWh/año}$$

Estimación de la velocidad y dirección del viento mediante la escala de Beaufort

La escala de Beaufort es una clasificación de los efectos del viento que permite conocer, en forma aproximada, la velocidad del viento en un lugar sin necesidad de utilizar aparatos de medición. Para utilizar la escala de Beaufort, solo necesitan efectuarse algunas observaciones del efecto que produce el viento sobre el medio ambiente. Para lograr una buena aproximación del viento en un lugar, es necesario efectuar observaciones parecidas a las señaladas anteriormente, varias veces al día, cuando menos durante cuatro semanas.

Estimación de la velocidad del viento en La Palmira

El procedimiento general para la evaluación aproximada de la velocidad promedio anual y sus direcciones preferenciales con el objetivo de su posterior aprovechamiento en La Palmira, se basó en una cuidadosa y sistemática observación de fenómenos naturales.

Con la información obtenida se realiza un análisis estadístico que determina en forma cuantitativa y ponderada la medida de velocidad del viento; el valor de la velocidad media del viento en el periodo en el que se hicieron las observaciones es de $\bar{v} = 5,51 \frac{m}{s}$

Estimación de la dirección predominante

La figura 2 muestra que la dirección predominante en el caserío La Palmira, en el periodo que se tomaron las muestras en el norte.



Determinación de las características del viento en el sitio de estudio con WASP

Para determinar las características del viento en un sitio de estudio existen actualmente en el mercado dos tipos de programas: los programas basados en dinámica de fluidos computacionales CFD con un desarrollo matemático y elementos finitos como Windsim, Windim, Meteosim, etc.; y los programas que utilizan modelos de cálculo aproximados como WASP, Windfarmer, Windfarm, Windpro.

La ventaja de los primeros es que son capaces de reproducir los campos de viento de una forma más precisa, la desventaja es que necesitan más parámetros de entrada lo que puede inducir a errores y más tiempo de cálculo. La ventaja de los segundos es que son más rápidos y tienen un uso muy extendido lo que hace que se conozcan sus limitaciones y fallos y sea fácil llegar a un resultado correcto aplicando correcciones conocidas.

WASP utiliza un modelo de flujo que permite modelar el comportamiento del viento sobre el terreno, incluyendo los efectos de orografía, rugosidad, obstáculos y turbinas adyacentes. En un principio fue desarrollado como parte del proyecto de atlas europeo de viento,

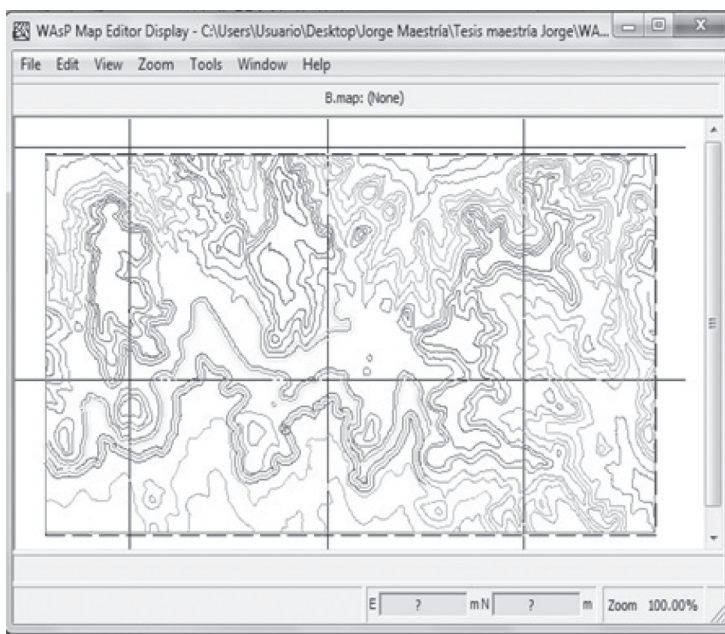
y posteriormente adaptado al estudio de parques eólicos. La metodología para evaluar la producción de energía eólica en La Palmira utilizando WASP se describe a continuación.

Características del mapa: orografía y rugosidad

Para introducir la información referente a la orografía y rugosidad del sitio de estudio en WASP, se partió de un fichero de AutoCAD (*.dwg), luego con la ayuda del **Map Editor** se crearon y modificaron las curvas de nivel y la rugosidad del terreno en función de sus características.

La ventaja del Map Editor es que además de ser el único programa capaz de crear mapas legibles por WASP, trabaja por colores, como se puede observar en la figura 3, con lo que es fácil encontrar un error en una línea.

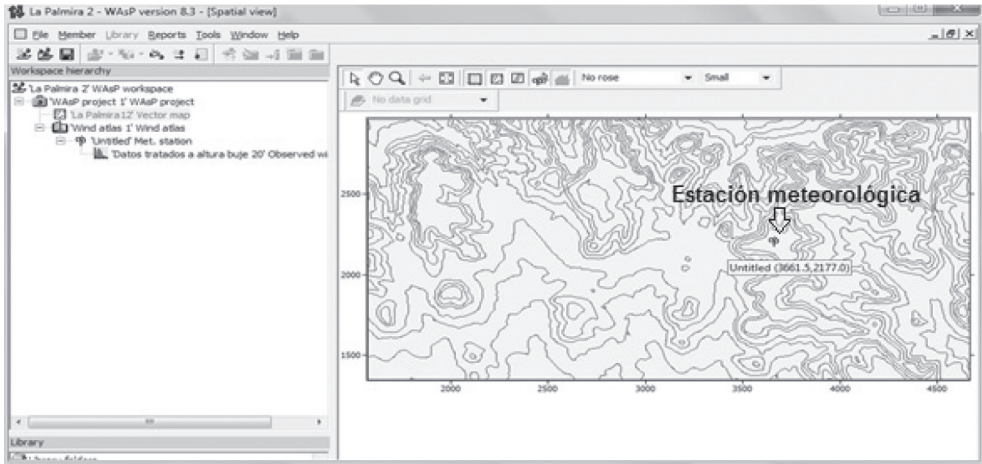
Figura 3
Representación del sitio de estudio en Map Editor



Inserción de la estación meteorológica

A continuación es necesario declarar las coordenadas de la torre o estación de medición para que WASP pueda situar dicha torre en el mapa. Se coloca un subnivel por debajo del Wind Atlas en el nivel jerárquico:

Figura 4
Ubicación de la estación meteorológica en WAsP

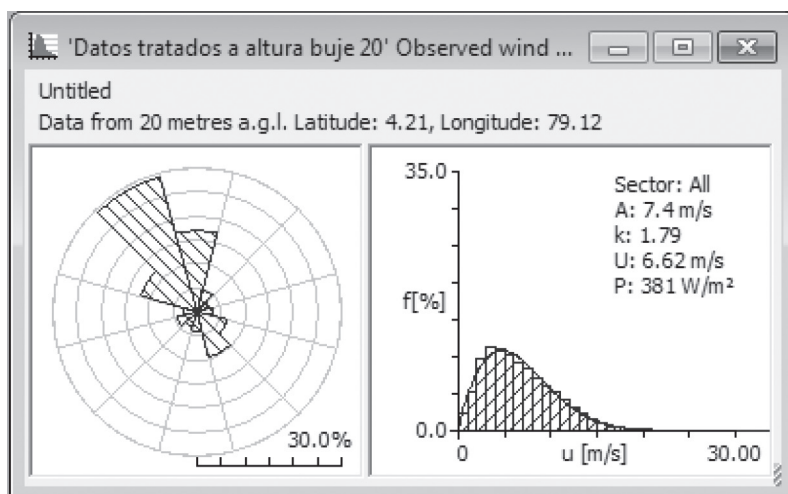


Análisis de los datos meteorológicos (OWC)

Los datos de viento utilizados por WAsP se insertan en el OWC (Observed Wind Climate), para ello WAsP guía a través de un asistente donde se introduce el archivo que contiene los datos de velocidad y dirección del viento.

En el presente estudio se utilizaron 51.828 datos diezminutales, al abrir el archivo directamente, WAsP lo entiende y lo muestra como se ve en la figura 5, donde se observa la velocidad media del viento, la densidad media de energía, los parámetros k y A .

Figura 5
Dirección y velocidad promedio del viento



Método de la extrapolación temporal y espacial

Para la estimación de la velocidad en la zona de estudio se utilizó los datos del viento de la estación meteorológica M145 Quinara, del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), que está ubicada en la parroquia Quinara, a 9.5 km de la zona de estudio. Las mediciones anemométricas de la referida estación son realizadas a 20 m de altura, cada 10 min:

Tabla 2
Velocidad media de viento en Quinara

Mes de 2009	Vv (m/s) a 20 m
enero	3.0
febrero	3.5
marzo	3.9
abril	4.1
mayo	4.4
junio	4.6
julio	4.8
agosto	4.9
septiembre	4.1
octubre	3.7
noviembre	3.4
enero 2010	3.1

Método de la ley exponencial

Para estimar la variación de la velocidad del viento con la altura, se utiliza una ecuación estadística conocida como Ley Exponencial de Hellmann, que se expresa como:

$$V = V_o \cdot \left(\frac{Z}{Z_o} \right)^\alpha \quad (4)$$

Donde:

V : es la velocidad del viento en el sitio a la altura Z

V_o : es la velocidad en el sitio a la altura Z_o

Z : es la altura a extrapolar

Z_o : es la altura de medición

α : es el coeficiente de la función exponencial, está dada por la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{1}{\ln\left(\frac{15,25}{Z_1}\right)} \quad (5)$$

Z_1 es el parámetro de rugosidad ≈ 0.055 ; entonces se tiene:

$$\alpha = 0,177$$

Aplicando la ley exponencial de Hellmann, para las condiciones antes establecidas, se determinó la velocidad del viento a corto plazo a una altura de 10 m:

Tabla 3
Velocidad del viento de Quinara a 10 m

Mes de 2009	Vv(m/s) a corto plazo a 20 m	Vv (m/s) a corto plazo a 10 m
enero	3.0	2.7
febrero	3.5	3.1
marzo	3.9	3.4
abril	4.1	3.6
mayo	4.4	3.9
junio	4.6	4.1
julio	4.8	4.2
agosto	4.9	4.3
septiembre	4.1	3.6
octubre	3.7	3.3
noviembre	3.4	3.0
enero 2010	3.1	2.7

Debido a que el periodo de mediciones realizado en Quinara fue de un año; es decir, mediciones a corto plazo, estas mediciones se deben estimar a largo plazo, para ello, se utilizó como medición de referencia los datos proporcionados por la estación meteorológica M033 La Argelia, para el mismo período. La ecuación para el método proporcional es la siguiente:

$$\overline{Vc} = \overline{Vl} \cdot \left(\frac{\overline{V}}{\overline{Vo}} \right)$$

En donde:

Vc : es el valor medio a largo plazo en el sitio

Vl : es el valor medio para el período de mediciones

Vo es el valor medio correspondiente al mismo corto período de mediciones, en la estación de referencia

V_V : es el valor medio correspondiente a un largo período en la estación de referencia

Una de las fórmulas que realiza ambas extrapolaciones a la vez, cuando se trata de terrenos llanos y en un entorno cercano a la estación de referencia de medición es:

$$V_Z = V_{Zr} \frac{\ln\left(\frac{60}{Z_{or}}\right) \ln\left(\frac{Z}{Z_1}\right)}{\ln\left(\frac{60}{Z_o}\right) \ln\left(\frac{Z_r}{Z_{or}}\right)} \quad (7)$$

Donde:

V_z : es la velocidad del viento, a la altura Z

V_{zr} : es la velocidad del viento en la estación de referencia, a la altura Z_r

Z : altura de la torre de la aerogenerador

Z_r : altura del anemómetro con respecto al suelo en la estación de referencia

Z_o : altura de la rugosidad en el sitio de emplazamiento

Z_{or} : altura de la rugosidad superficial en la estación de referencia

La siguiente tabla muestra los resultados de la extrapolación de datos de la velocidad del viento medida desde 20 m a 10 m:

Tabla 4
Viento a 10 m largo plazo

Mes	Vv (m/s) Quinara	Vv (m/s) La Palmira
enero	7.2	6.2
febrero	5.5	4.9
marzo	9.8	8.5
abril	7.4	6.4
mayo	8.2	7.1
junio	5.9	5.1
julio	5.6	4.8
agosto	7.4	6.4
septiembre	4.4	3.7
octubre	6.5	5.6
noviembre	5.8	5.0
enero 2010	5.7	4.9
Velocidad media		5.7

Para la caracterización del viento se usa la ley de densidad de probabilidad de Weibull, que facilita una expresión matemática para predecir el comportamiento de la velocidad de viento en un cierto tiempo.

$$(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (8)$$

Donde:

$p(v)$ probabilidad estadística de que ocurra una velocidad v

k : factor de forma (adimensional)

c : factor de escala, (m/s)

v : velocidad promedio anual

Para determinar los parámetros de k y c , para el sitio de estudio, se empleó el método de variabilidad del viento, el parámetro k se determinó con la siguiente ecuación:

$$k = 0,94 \cdot \sqrt{\bar{v}} \quad (9)$$

Mientras que el parámetro c , se determinó mediante la siguiente expresión:

$$c = \left(\frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \right)^{1 + \frac{1}{k}} \quad (10)$$

En donde:

$\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$: Función Gamma evaluada en: $1 + \frac{1}{k}$

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5
Parámetros de Weibull a 10 m de altura

Mes	Vv (m/s) (La Palmira largo plazo a 10 m)	Weibull	
		k	c
enero	6.29	2.36	7.10
febrero	4.79	2.06	5.40
marzo	8.54	2.75	9.59
abril	6.46	2.39	7.29
mayo	7.11	2.51	8.01
junio	5.14	2.13	5.80
julio	4.86	2.07	5.48
agosto	6.41	2.38	7.23
septiembre	3.78	1.83	4.26
octubre	5.69	2.24	6.43
noviembre	5.08	2.12	5.73
enero 2010	4.93	2.09	5.56

Determinación del potencial eólico disponible

Una masa de aire m , con velocidad v , posee una energía cinética E_c , que viene dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (11)$$

El caudal másico de aire (\dot{m}) de densidad (ρ) que fluye a través de una superficie de área (A) perpendicular a la dirección del flujo es:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (12)$$

La potencia disponible (P_d) asociada al caudal de aire que atraviesa dicha sección es:

$$P_d = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (13)$$

La densidad de potencia (P_d/A) se define como:

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \quad (14)$$

El factor de energía o factor de irregularidad F_e , viene dado por la expresión:

$$F_e = \frac{\langle v^3 \rangle}{\langle v \rangle^3} = \frac{\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (15)$$

Los resultados que muestran la potencia eólica por unidad de área en el sitio de estudio se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6
Potencia eólica La Palmira a 10 m de altura

Mes	Vv (m/s) Largo plazo	k	(Fe)	W/m ²
enero	6.29	2.36	1.6458	251.20
febrero	4.79	2.06	1.8597	124.85
marzo	8.54	2.75	1.4764	562.68
abril	6.46	2.39	1.6362	270.73
mayo	7.11	2.51	1.5772	346.74
junio	5.14	2.13	1.8001	149.36
julio	4.86	2.07	1.8483	129.76
agosto	6.41	2.38	1.5702	252.92
septiembre	3.78	1.83	2.0984	69.64
octubre	5.69	2.24	1.7208	194.32
noviembre	5.08	2.12	1.8121	145.18
enero 2010	4.93	2.09	1.8359	134.54
Promedio	5.72	2.2		219.33

Producción de energía

Se realizó el cálculo de la producción de energía de los aerogenerador Bornay 6000 y Bergey Excel, posteriormente se calculó sus horas equivalentes de funcionamiento, el aerogenerador que se seleccionará será aquel que tenga el mayor número de horas equivalentes de funcionamiento al año.

Los resultados obtenidos para la determinación de la energía generada con los aerogeneradores Bornay y Bergey, en la comunidad la Palmira, utilizando WAsP y el método de la curva de potencia, se presenta a continuación una tabla comparativa.

Tabla 7
Determinación de la energía anual producida

Energía producida en La Palmira (MWh/año)		
Método	Bornay 6000	Bergey EXCEL
WAsP	20.11	21.68
Curva de Potencia	19.50	24.97

El factor de capacidad (FC), se expresa por la relación siguiente:

$$Fc = \frac{E}{Pn \cdot 8760} \quad (16)$$

Donde:

E: Energía anual producida por el aerogenerador.

Pn: Es la potencia nominal del aerogenerador.

El factor de capacidad para el aerogenerador Bornay 6000 es:

$$Fc = \frac{19505,9 KWh/año}{6KW \cdot 8760} = 0,37 = 37\%$$

El factor de capacidad para el aerogenerador Bergey Excel es:

$$Fc = \frac{24977,7 KWh/año}{7,5KW \cdot 8760} = 0,38 = 38\%$$

Dimensionamiento del banco de baterías

La capacidad del banco de baterías se determina por la siguiente expresión:

$$C_{BB} = \frac{Eg \cdot D_A}{V_S \cdot P_D} \quad (17)$$

Donde:

C_{BB} : capacidad de banco de baterías (Ah)

E_g : energía eléctrica demandada

V_s : voltaje del sistema

D_A : días de autonomía

P_D : profundidad de descarga

Conociendo que la energía a satisfacer es de 52.9 kWh/día la capacidad del banco de baterías es:

$$C_{BB} = \frac{52920 \cdot 2}{24 \cdot 0,60}$$

$$C_{BB} = 7.350 \text{ Ah}$$

El número total de baterías N_{TB} , se determina por:

$$N_{TB} = N_{BS} \cdot N_{BP} \quad (18)$$

Donde:

N_{BS} : Número de baterías en serie

N_{BP} : Número de baterías en paralelo

Las baterías en serie se determinan por la siguiente expresión:

$$N_{BS} = \frac{VS}{VB} \quad (19)$$

Donde:

VS : voltaje del sistema

VB : voltaje de la batería

Las baterías en paralelo se determinan por la siguiente expresión:

$$N_{BP} = \frac{C_{BB}}{C_{BU}} \quad (20)$$

Donde:

C_{BU} : capacidad de batería unitaria

La batería seleccionada es una batería sellada de ciclo profundo, de 220 amperios hora y de 12VDC. El número de baterías que se necesita conectar en serie es:

$$N_{BS} = \frac{24}{12} = 2$$

El número de baterías en paralelo que se necesita conectar es:

$$N_{BP} = \frac{7350}{220} = 33,4 \approx 34$$

El número total de baterías que se necesita es:

$$N_{TB} = 2 \cdot 34 = 68$$

Selección del dispositivo regulador e inversor

El regulador es el dispositivo encargado de proteger al banco de baterías de sobrecargas por parte del aerogenerador y de, la selección del regulador depende de la intensidad de corriente que entra al banco de baterías. Para determinar la intensidad de corriente, se puede partir de la siguiente expresión:

$$P = V \cdot I \quad (21)$$

Donde:

P : potencia del generador eléctrico (6000 W)

V : voltaje del sistema (24 V)

I : intensidad de corriente

Despejando la variable I , de la ecuación 21, se obtiene:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{6000}{24} = 250 \text{ Amperios}$$

Selección del inversor

La selección del inversor se realiza en función de la potencia que consume cada uno de los equipos de la demanda, entonces la potencia total (P_t) es de:

$$P_t = 540.15 = 8.100 \text{ W}$$

A partir de la potencia total y en función de garantizar que el sistema eólico pueda abastecer y cubrir la adición de nuevos equipos, la potencia nominal se estimará con un incremento del 30%.

$$P_N = 1.3 \cdot P_t$$

$$P_N = 1.3 \cdot 8100 \text{ W} = 10.530 \text{ W}$$

La eficiencia para los inversores modernos es superior al 85%, y se expresa a través de la siguiente expresión:

$$\eta_t = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \quad (22)$$

Donde:

η_t : eficiencia del inversor

P_{sal} : potencia de salida

P_{ent} : potencia de entrada

La potencia de salida del inversor será:

$$P_{sal} = \frac{P_{ent}}{\eta_t} = \frac{10530}{0,95} = 11.084,2 \text{ W} = 11 \text{ KW}$$

Evaluación económica

La fórmula utilizada para el cálculo del costo de la electricidad producida es la siguiente:

$$Cg = \frac{C \cdot R + M}{E} \quad (23)$$

Donde:

Cg: Costo unitario de la electricidad (USD/kWh)

C: Costo total de la inversión inicial (USD)

E: Energía producida anualmente (kWh)

M: Costo anual de operación y mantenimiento (USD)

R: Factor de recuperación de la inversión, el cual se determina por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}} \quad (24)$$

Donde:

n: años de vida útil = 10 años

r: tasa neta de retorno = 8%

$$R = \frac{0.08}{1 - (1 + 0.08)^{-10}} = 0,148$$

La energía de salida producida anualmente por la instalación se determina por la siguiente ecuación:

$$E = Et \cdot N \cdot d \quad (25)$$

Donde:

Et: producción anual de energía (kWh/año)

d: disponibilidad de la instalación (90%)

N: número de aerogeneradores (1)

Resolviendo la ecuación 25, se tiene:

$$E = 20.110 \cdot 1 \cdot 0.9 = 18.099,0 \frac{\text{KWh}}{\text{año}}$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 23, se obtiene el costo del kWh:

$$Cg - \text{eólico} = 0,51 \frac{\text{USD}}{\text{KWh} - \text{año}}$$

Se presenta a continuación el costo de del kWh, mediante las siguientes alternativas:

Generador diesel. Para cubrir la demanda proyectada en la comunidad La Palmira, se necesitan 3 generadores diesel de 23 kW, y con la finalidad de cuidar su tiempo de vida útil, se estiman trabajando al 80% de su carga máxima, durante 8 horas al día, lo que representa una potencia efectiva de 18.4 kW. El costo de la electricidad producida con el sistema de generación diesel, es:

$$Cg - \text{diesel} = 0,08 \frac{\text{USD}}{\text{KWh} - \text{año}}$$

Ampliación de red eléctrica. La distancia desde La Palmira al punto más cercano disponible para extender la red eléctrica es de aproximadamente 9.5 km, lo que a un costo estimado de 10.000.00 USD por km la red de baja tensión, representa un costo aproximado de inversión de 95.000.00 USD y entonces el costo del kWh estará bordeando los 9 ctvs. USD.

Conclusiones

Se proyectó un sistema de generación eólico autónomo, que se fundamenta en las condiciones reales del viento en la comunidad rural La Palmira y que permite aprovechar el potencial eólico existente en esta localidad, para suministrar energía que satisfaga los 19.315.8 kWh/año que representa la demanda anual de energía eléctrica del sector.

Con la ayuda del software WAsP se determinó que La Palmira presenta características de viento adecuadas para su explotación energética con fines de generación eléctrica, gracias a esta herramienta informática se obtuvo información fundamental, que sirve de soporte en la planificación de proyectos de generación eléctrica con energía eólica, como son los parámetros k y c de Weibull, la dirección de viento predominante, la velocidad media promedio, la densidad de energía eólica, la producción anual de energía, entre otros y con las extensiones del programa es posible la edición e introducción de valores numéricos y de mapas, que establecen las bases para salvar muchas de las barreras que podrían limitar el emprendimiento en estos proyectos.

Los resultados obtenidos en la determinación de la velocidad media anual del viento en La Palmira con el software WAsP, fueron contrastados con dos diferentes metodologías. En el primer caso se comparó los resultados con el método de la escala Beaufort, obteniéndose un error de 19.4%, debido fundamentalmente a la altura a la que se realizó la medición. En el segundo caso se comparó el resultado de WAsP con el resultado del método de la extrapolación espacial y temporal, obteniéndose un error de 13.6%, que se al parámetro de rugosidad que utilizan ambos métodos.

Recomendaciones

Aunque la implementación de un sistema de generación eólica en la comunidad La Palmira implica en principio impactos ambientales mínimos, se requiere llevar a cabo estudios más profundos en cuanto al posible impacto que pudiera tener el uso de este tipo de sistemas en el medio ambiente y en la avifauna de la localidad.

Para futuros trabajos con el objeto de evitar de incurrir en errores, es necesario completar las series de las mediciones de la estación meteorológica Quinara, de tal manera de tener los 52.560 datos diezminutales que es la cantidad de mediciones en un año. Se recomienda los estudios para el perfeccionamiento de este proyecto en cuanto al análisis técnico económico.

Bibliografía

- Borja, M.
2008 *Manual para la estimación de la velocidad del viento*. México: Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Caldera, E., Martínez, A., Borja, R., Borja, M. y Saldaña, R.
1994 *Estimación de la velocidad promedio anual de viento en un sitio de posible aprovechamiento*. México: Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- CIEMAT
1997 *Principios de conversión de la energía eólica*. Madrid: CIEMAT.
- CONELEC
2009 "Plan maestro de electrificación 2009-2020". Ecuador: CONELEC.
- Hernández, D.
2009 "Electrificación de la comunidad de Prudencio de un sistema híbrido eólico fotovoltaico". Tesis de Ingeniería Mecánica de la ISPJAE. Venezuela.
- Maestre Gaya, A.
2008 *Energía eólica. Aerogeneradores*. España: Universidad de Sevilla.
- Maldonado, J.
2003 "Metodología de cálculo para un aerogenerador moderno de eje horizontal". Tesis de la Universidad Nacional de Loja. Ecuador.
- MEER
2009 "Políticas y estrategias para el cambio de la matriz energética del Ecuador". Ecuador: MEER.
- Ponce, G. y Roberts, G.
2002 *Bioindicadores. Una útil herramienta en la prospección de velocidades medias del viento*. Argentina: Universidad central de la Patagonia.